

文章编号:1000-582X(2004)01-0069-04

# 超滤膜过滤通量计算模型的实验\*

向平<sup>1,2</sup>, 蒋绍阶<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 城市学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**采用中空纤维超滤膜装置去除饮用水中污染物,实验结果表明操作压力约在 0.2MPa 内,过滤通量与操作压力成线性增加关系;在操作压力恒定时,过滤通量随着原水溶液浓度的增加而减少。并指出原水中有机物的含量对过滤通量的影响较大,为了提高过滤通量,可降低溶液中有机物的浓度。通过对实验数据进行线性回归,提出了超滤膜过滤通量计算的公式,同时还认为该计算模型可给类似体系的超滤工程设计提供参考依据。

**关键词:**超滤膜;中空纤维超滤膜装置;过滤通量;截留分子量

**中图分类号:**TU991.24

**文献标识码:**A

自 60 年代以来,超滤从一种实验规模的分离手段很快发展成为工业单元操作技术,被日益广泛地用于食品、医药、水处理以及新兴的生物技术等领域。它可用于某些含有各种小分子量可溶性物质和高分子物质(如蛋白质、酶、病毒等)溶液的浓缩、分离、提纯和净化。在超滤过程中,膜污染和浓差极化会导致过滤阻力不断增加,膜通量逐渐减小,因此影响着分离效果和过程的可靠性<sup>[1]</sup>。膜污染和浓差极化的影响因素有操作压力、流速、温度、原水浊度、有机物的含量等。笔者就操作压力、原水浊度和有机物的含量与膜通量的关系进行探讨。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

试验采用自来水为主体,投加一定量牛肉膏、蛋白胨、以及生活污水配制成试验用原水(模拟受污染的水源水)进行试验<sup>[2]</sup>。其水质参数  $COD_{Mn}$  最大值为 25.2 mg/L,最小值为 2.53 mg/L;浊度最大值为 8.291 NTU,最小值为 0.528 NTU。研究采用超滤膜净水装置的工艺流程图如图 1 所示。

超滤膜组件为内压中空纤维超滤膜组件,采用的是聚砜(PS)超滤膜,截留分子量为 6 000~10 000。组件的外形尺寸为 90×590,膜过滤表面积为 2.0 m<sup>2</sup>。

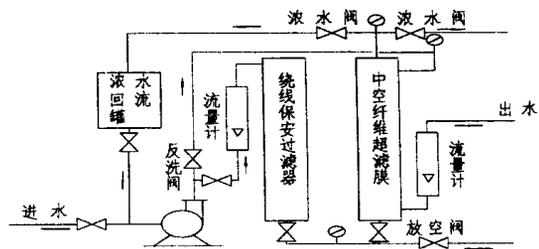


图 1 试验装置简图

超滤膜的作用是去除水中细小的悬浮颗粒胶体、细菌和部分有机物。超滤膜前采用绕线保安过滤器,其主要作用是除去进水中较大的悬浮固体颗粒和胶体。

### 1.2 主要分析项目和方法

测定超滤膜的工作压力、进水流量、出水流量、水温、有机物含量以及浊度。膜组件的进水与出水的有机物质含量用高锰酸钾法测定,用  $COD_{Mn}$  近似表示混合液中有机物的浓度。浊度用 HACH 2100 N 浊度仪测定。

### 1.3 实验结果与讨论

#### 1.3.1 压力与过滤通量的关系

用出水流量与膜面积的比值作为过滤通量,在进水水溶液浓度不变的条件下,调节超滤膜的操作压力  $P$ ,得出超滤膜的工作压力与过滤通量的关系如图 2 所示。

\* 收稿日期:2003-09-22

基金项目:国家十五科技攻关项目“饮用水微污染物膜处理技术与设备”(2001BA604A01-05-02)

作者简介:向平(1974-),女,四川南充人,重庆大学讲师,在读硕士研究生,主要从事给水处理的教学与研究工作。

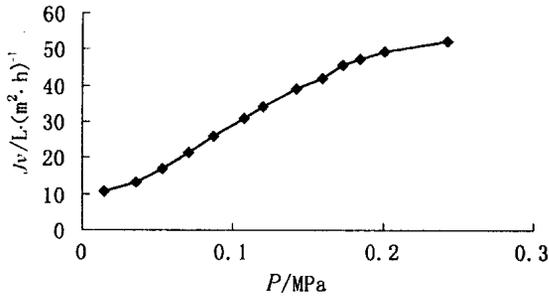


图2 压力与通量的关系

从图2中可知,在操作压力较低情况下过滤通量与操作压力基本成线性关系。而当压力达到0.2 MPa附近,通量的增加变缓,这可用浓差极化现象得到解释。随着过滤的进行,当膜面上截留溶质浓度增加到一定值时,在膜面上会形成一层称为凝胶层的非动层,凝胶层对膜的过滤通量有很大的阻力<sup>[3]</sup>。故再增加操作压力,只能使凝胶层的厚度增加,所增加的压力都消耗在增厚的凝胶层的阻力上,从而过滤通量的增加变缓,最后趋于平稳。

### 1.3.2 溶液浓度与过滤通量的关系

用所加入的混合液溶质的质量与过滤水量的比值作为溶液浓度,以过滤通量与操作压力的比值作为比过滤通量以消除压力对过滤通量的影响,调节不同的溶液浓度得出溶液浓度与比过滤通量的关系如图3。

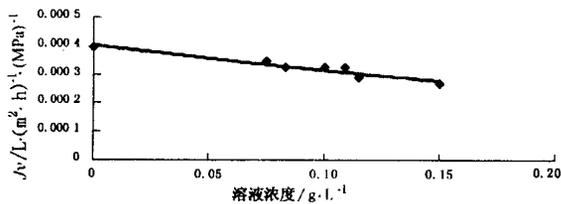


图3 通量与溶液浓度的关系

从图3中可发现如果操作压力相同,随着溶液浓度的增加,过滤通量逐渐减少。

## 2 膜过滤通量计算模型分析

### 2.1 试验方法

天然水体中存在最多的2种物质是无机浊度物质和天然有机物质,这两种物质的含量在实验中通过浊度和 $COD_{Mn}$ 来近似表示。通过改变原水溶液浓度,使得所模拟的受污染的水源水的浊度和 $COD_{Mn}$ 的含量改变,从而考察浊度和 $COD_{Mn}$ 与过滤通量的关系。

原水经绕线保安过滤器进入中空纤维超滤膜组件过滤。试验中控制膜过滤压力为0.1 MPa,通过改变原水中的各种溶质的浓度,使得中空纤维超滤膜组件进水中的浊度和 $COD_{Mn}$ 改变。每组实验完毕后,先用自来水冲洗30 min,再用 $400\text{ mg}^{-1}\text{Cl/L}$ 的 $\text{NaClO}$ 溶液冲洗3 h,最后再用自来水冲洗以消除膜污染和浓差极化的影响。在保安过滤器的出水处测得浊度和 $COD_{Mn}$ ,以准确计量中空纤维超滤膜组件进水处的浊度和 $COD_{Mn}$ 。试验数据以系统运行到稳态时的测得数据为准。

### 2.2 实验结果与分析

试验共作了8组,结果见表1。

表1 浊度和 $COD_{Mn}$ 对 $J_V$ 影响实验结果

序号	进水浊度/NTU	进水 $COD_{Mn}/\text{mg L}^{-1}$	出水浊度/NTU	出水 $COD_{Mn}/\text{mg L}^{-1}$	过滤通量 $J_V/\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$
1	2.382	17.161	0.318	14.467	28
2	1.719	17.021	0.093	15.123	30
3	3.210	19.082	0.046	14.519	27
4	2.330	16.027	0.020	10.205	29
5	1.422	14.415	0.253	12.245	31
6	4.152	18.685	0.032	11.799	26
7	4.122	20.488	0.123	15.308	24
8	0.959	12.572	0.052	9.569	36

对表1的数据进行整理,以过滤通量 $J_V$ 的自然对数( $\ln J_V$ )为纵坐标和进水浊度( $\ln$  浊度)的自然对数为横坐标作图,所得各点趋于一条直线。经计算得到过滤通量 $J_V$ 和进水浊度的关系为:

$$\ln J_V = 3.5449 - 0.2296 \ln \text{浊度},$$

$$\text{即 } J_V = 34.64 \text{ 浊度}^{-0.23} \quad (1)$$

相关系数:  $r = -0.9698$

以过滤通量 $J_V$ 的自然对数( $\ln J_V$ )为纵坐标和进

水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的自然对数 ( $\ln \text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 为横坐标作图, 所得各点趋于一条直线。经计算得到过滤通量  $J_V$  和进水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的关系为:

$$\ln J_V = 5.4517 - 0.7435 \ln \text{COD}_{\text{Mn}},$$

$$\text{即 } J_V = 233.15 \text{COD}_{\text{Mn}}^{-0.74} \quad (2)$$

相关系数:  $r = -0.9637$

对运行中的进水浊度和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的值作线性回归得到方程为:

$$\text{COD}_{\text{Mn}} = 11.9599 + 1.96 \text{ 浊度} \quad (3)$$

相关系数:  $r = 0.91$

为了综合考察进水中的浊度以及有机物的含量对膜过滤通量的影响, 将进水的浊度的平均值, 浊度 = 2.537 NTU 代入式(3), 得出  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的值, 记为  $\text{COD}_{\text{Mn}} = 16.931 \text{ mg/L}$ , 并将这两个值作为实验中浊度和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的标准值。把浊度和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的值分别代入式(1)和式(2), 求出对应的膜过滤通量的值, 并将此作为相应因素的膜过滤通量的标准值。同时定义实际过滤通量与标准过滤通量的比值为对应各因子的过滤通量的相关系数, 分别记为  $B_1$  和  $B_2$ <sup>[4]</sup>, 于是有:

$$B_1 = (\text{浊度} / 2.537)^{-0.23} \quad (4)$$

$$B_2 = (\text{COD}_{\text{Mn}} / 16.931)^{-0.74} \quad (5)$$

另外, 假设当膜工作条件与水温都相同时,  $J_V$  只与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和浊度有关, 所以有:

$$J_V = M \times (B_1 \times B_2) \quad (6)$$

将表 1 中有关数据代入式(4)、式(5)和式(6), 进行数据处理有:

$B_1 \times B_2$  与  $M$  的值进行线性回归得:

$$\ln M = 3.3392 - 0.4845 \ln (B_1 \times B_2),$$

$$\text{即 } M = 28.197 (B_1 \times B_2)^{-0.48} \quad (7)$$

相关系数:  $r = -0.9785$

由式(4)、式(5)、式(6)和式(7)得:

$$J_V = 92.3886 \text{ 浊度}^{-0.12} \text{COD}_{\text{Mn}}^{-0.38} \quad (8)$$

已知超滤膜过滤通量  $J_V$  与阻力的关系符合达西定律  $J_V = P / \mu_w R_{\text{总}}$ <sup>[5]</sup>, 并以此作为超滤过滤通量的基本方程:

$$J_V = P / \mu_w R_{\text{总}} \quad (9)$$

式中:  $J_V$  为膜渗透极限通量,  $\text{L} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $P$  为膜的操作压力,  $\text{MPa}$ ;  $\mu_w$  为滤液的动力粘性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $R_{\text{总}}$  为膜过滤总阻力,  $\text{L} / \text{m}$ 。

式中  $R_{\text{总}}$  为膜过滤总阻力, 包括膜的固有阻力和膜表面截流杂质形成凝胶层的阻力, 对这些阻力的计算已有不少研究<sup>[5-6]</sup>, 通过实验求出浊度和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  对过滤通量的影响, 从而求出  $R_{\text{总}}$  的经验公式。在此次操

作过程中,  $P = 0.1 \text{ MPa}$ ; 由于原水浊度和有机物浓度较低,  $\mu_w$  近似取 20 时水的动力粘性系数  $1.029 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 由式(8)和式(9)得:  $R_{\text{总}} = 1.0519 \times 10^6 \text{ 浊度}^{0.12} \text{COD}_{\text{Mn}}^{0.38}$  再代入式(9)得截留分子量为 6 000 ~ 10 000 的聚砜 (PS) 超滤膜过滤通量的经验公式:

$$J_V = P \text{ 浊度}^{-0.12} \text{COD}_{\text{Mn}}^{-0.38} / 1.0519 \times 10^6 \mu_w$$

### 3 超滤膜过滤通量的计算值与试验值的比较

控制超滤膜不同的操作条件, 得出超滤膜过滤通量的计算值与试验值的比较如图 4。

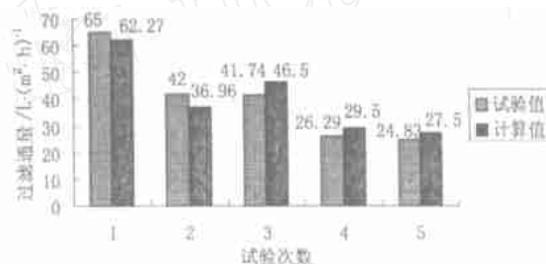


图 4 超滤膜过滤通量试验值与计算值的比较

由图可知, 在相同的温度、浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和操作压力的情况下, 其超滤通量的计算值与实测值的误差小于 15%, 因此本文中经验公式可用于截留分子量为 6 000 ~ 10 000 的聚砜 (PS) 超滤膜过滤通量的工程计算。

### 4 结论

1) 文中经验公式包含了溶液的浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、压差和动力粘滞系数 4 个与过程有关的操作参数。因此, 若使用相同的膜及操作应用体系确定, 则该公式可用于预测过滤通量及估算工程操作参数, 以得到最佳工作条件。

2) 在其他操作条件相同的情况下,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较浊度对通量的影响大。因此, 为了提高过滤通量, 可降低溶液中有机的浓度。例如在超滤前引入活性炭过滤处理工艺, 就是一项有效的方法。

### 参考文献:

- [1] 刘茉娥. 膜分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [2] 张捍民, 王宝贞. 淹没式中空纤维膜过滤装置去除饮用水中污染物的实验研究[J]. 给水排水, 2000, 26(6): 28-31.
- [3] 邵刚. 膜法水处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [4] 王亚娥, 欧阳铭, 朱联锡. 膜生物反应器中 UF 膜过滤阻力影响因素[J]. 中国给水排水, 2000, 16(4): 55-57.
- [5] 王锦, 王晓昌, 何自琦. 浊度和腐殖酸对超滤膜污染过程

的研究[J].膜科学与技术,2002,22(1) 24 - 28.

[J].水处理技术,1999,25(3) 144 - 147.

[6] 陈欢林.超滤膜污染指数模型及其在工程设计中的应用

## Experimental Research on UF Membrane Flux Model

XIANG Ping<sup>1,2</sup>, JIANG Shao-jie<sup>2</sup>

(1. City College, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Urban Construction Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract**: The hollow fiber UF membrane system is used for removing pollutants from drinking water. The experimental results show the filtration flux steadily increases with the working pressure in the range of the working pressure lower than 0.2MPa; the filtration flux decreases with the concentration of the raw water at the constant working pressure. The lower the organic substance of raw water is the higher the filtration flux is. Linear regression method is applied to the experimental data, and the UF membrane flux model is presented. Meanwhile the model can be used to design UF process for similar liquid mixture system.

**Key words**: ultra-filtration(UF) membrane; hollow fiber UF membrane system; filtration flux; molecular weight cut off

(编辑 姚 飞)

(上接第 68 页)

## Dynamic Responses of the High Slender Structure Under Non-Gaussian Model of Wind Load

WANG Zhong-gang<sup>1,2</sup>, CHENG Hua<sup>1</sup>, DENG Hong-zhou<sup>2</sup>

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract**: With reference to the effect of the quadratic component of turbulent-wind fluctuation, the statistical moments of wind load up to the 4<sup>th</sup> order are derived and the spectrum densities are given based on the Fourier transformation. By means of the Gram-Charlier series, the first-order probability densities of the structure responses are then constituted with the former 4<sup>th</sup> order central moments of responses. Under the independent hypothesis of the structural displacement and its derivative, whose applicability is verified by the correlation between the two signals, the joint probability density function is developed and a numerical scheme for the analysis of the dynamic behaviors of the high slender structure under wind excitation is obtained. Parametric analysis on dynamic responses and reliability under both Gaussian and non-Gaussian models of wind load are then investigated.

**Key words**: dynamic responses; high slender structure; non-Gaussian; wind load;

(编辑 姚 飞)